

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

LUCAS ANTÔNIO VIEIRA GONÇALVES

**INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO CONTROLADO APÓS FORJAMENTO NAS
PROPRIEDADES FINAIS DE UM AÇO SAE 1050 TEMPERADO E REVENIDO**

Porto Alegre

2018

LUCAS ANTÔNIO VIEIRA GONÇALVES

**INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO CONTROLADO APÓS FORJAMENTO NAS
PROPRIEDADES FINAIS DE UM AÇO SAE 1050 TEMPERADO E REVENIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador:

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Afonso Reguly

Prof. Dr. Ing. Antonio Cezar Faria Vilela

Porto Alegre

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Gonçalves, Lucas Antônio Vieira

INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO CONTROLADO APÓS
FORJAMENTO NAS PROPRIEDADES FINAIS DE UM AÇO SAE
1050 TEMPERADO E REVENIDO / Lucas Antônio Vieira
Gonçalves. -- 2018.

49 f.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva
Rocha.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2018.

1. resfriamento controlado. 2. forjamento à
quente. 3. microestrutura. I. Rocha, Prof. Dr. Eng.
Alexandre da Silva, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

“Na vida eu aprendi que a vida nenhum valor ela tem, se não for uma vida bem vivida em prol da vida de alguém”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por cada dia renovar minhas forças para seguir com humildade e determinação.

Agradeço, especialmente, aos meus pais, Élio e Elaine, por serem os pilares da minha vida e por darem todo o carinho e suporte necessário para realizar o curso de engenharia metalúrgica.

Agradeço aos meus irmãos Alex, Éric e Tiago por me apoiarem em todos os momentos da minha vida.

Agradeço aos meus amigos Válter, Marcelo e Isabel por dedicarem o seu tempo para me auxiliar no desenvolvimento desse projeto.

Agradeço ao Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha por me orientar em cada etapa deste trabalho de conclusão de curso.

Por fim, agradeço, especialmente, a minha noiva Christine por não medir esforços para me ajudar e me tranquilizar durante esse período.

Muito Obrigado a todos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Fe-C	15
Figura 2 - Brochadeira vertical	19
Figura 3 - Diagrama TTT do aço SAE 1050	20
Figura 4 - Princípio da técnica de partículas magnéticas.....	25
Figura 5 - AIV integrando uma parte do sistema do semi-eixo	27
Figura 6 – AIV forjado, AIV sem tratamento e AIV temperado e revenido	27
Figura 7 - Equipamento medidor da composição química	28
Figura 8 - Fluxograma de processo do AIV antigo e novo	29
Figura 9 - Modelo de prensa Hatebur horizontal	30
Figura 10 - Máquina de corte	31
Figura 11 - Politriz e lixadeira rotativa	32
Figura 12 - Microscópio e Durômetros	33
Figura 13 - Microestrutura do núcleo sem resfriamento controlado, normalizada, temperada e revenida	36
Figura 14 - Microestrutura da zona de transição sem resfriamento controlado, normalizada, temperada e revenida	36
Figura 15 - Microestrutura da superfície sem resfriamento controlado, normalizada, temperada e revenida	37
Figura 16 - Microestrutura do núcleo sem resfriamento controlado e sem tratamento térmico	37
Figura 17 - Microestrutura da superfície sem resfriamento controlado e sem tratamento térmico	38
Figura 18 - Microestrutura do núcleo com resfriamento controlado, normalizado, temperado e revenido	38
Figura 19 - Microestrutura da zona de transição, com resfriamento controlado, normalizado, temperado e revenido	39
Figura 20 - Microestrutura da superfície, com resfriamento controlado, normalizado, temperado e revenido	39
Figura 21 - Microestrutura do núcleo com resfriamento controlado, sem tratamento térmico	39

Figura 22 - Microestrutura da superfície em 100x com resfriamento controlado, sem tratamento térmico	40
Figura 23 - Microestrutura do núcleo com resfriamento controlado, somente temperado	40
Figura 24 - Microestrutura da zona de transição com resfriamento controlado, somente temperado	41
Figura 25 - Microestruturta da superfície com resfriamento controlado, somente temperado	41
Figura 26 - Microestrutura do núcleo com resfriamento controlado, temperado e revenido	41
Figura 27 - Microestrutura da zona de transição com resfriamento controlado, temperado e revenido	42
Figura 28 - Microestrutura na superfície com resfriamento controlado, temperado e revenido	42
Figura 29 - (A) Forjados sem resfriamento controlado e (B) Forjado com resfriamento controlado em 100x de aumento	43
Figura 30 - Microestrutura da superfície do AIV com resfriamento controlado	44
Figura 31 - Perfil de dureza das etapas do estudo.....	45

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Especificações da fabricante	26
Tabela 2 - Composição química do SAE 1050 modificado (% em massa)	35
Tabela 3 - Resultado de dureza do Aço SAE 1050 sob diferentes condições de análise.....	455

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 DIAGRAMA Fe-C	15
2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA: Forjamento à quente	16
2.3 PROCESSO TERMOMECÂNICO DOS AÇOS.....	17
2.5 PROCESSOS DE USINAGEM: Brochamento	18
2.6 DIAGRAMAS TTT e CCT	19
2.7 TRATAMENTO TÉRMICO	20
2.7.1 Normalização	21
2.7.2 Endurecimento Superficial.....	21
2.7.3 Têmpera por indução	22
2.7.4 Temperabilidade.....	23
2.7.5 Meios de têmpera	23
2.7.6 Revenido	24
2.8 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 MATERIAIS	26
3.2 ETAPA DE FORJAMENTO	29
3.3 DEFINIÇÃO DAS AMOSTRAS	30
3.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA	31
3.5 PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL	35
4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	36
4.3 PERFIL DE DUREZA DAS AMOSTRAS	44

5.	CONCLUSÕES.....	46
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
6.	REFERÊNCIAS	478

RESUMO

Este trabalho apresenta a influência do resfriamento controlado após forjamento à quente nas propriedades finais do aço SAE 1050 modificado. Essa proposta foi realizada para a melhoria da microestrutura no processo de forjamento de anéis internos que são usados em semi-eixos de empresa do setor automotivo. Visto que o processo desenvolvido pelo fornecedor contratado pela empresa em questão não alcançou a microestrutura necessária, este estudo objetiva analisar as modificações dos parâmetros de processo para atingir uma microestrutura que atenda as especificações do produto. Para isso, o estudo seguiu três fluxos: (1) forjado sem resfriamento controlado normalizado, temperado e revenido; (2) forjado com resfriamento controlado por esteira ventilada normalizado, temperado e revenido; (3) forjado com resfriamento controlado por esteira ventilada temperado e revenido, em que foi analisado o comportamento dos perfis de dureza e microestruturas. Por fim, os resultados de dureza e microestrutura obtidos com a implementação do resfriamento controlado foram satisfatórios. Além disso, foi eliminada a etapa de tratamento térmico de normalização, gerando economia de energia e aumentando a produtividade da empresa devido à redução do tempo de processo.

PALAVRAS CHAVES: RESFRIAMENTO CONTROLADO; FORJAMENTO; MICROESTRUTURA

ABSTRACT

This work presents the influence of controlled cooling after hot forging on the final properties of modified SAE 1050 steel. This proposal was made to improve the microstructure in the process of forging inner rings that are used in sideshafts of companies of the automotive sector. Since the process developed by supplier contracted by the company in question did not reach the necessary microstructure, this study has objective to analyze the modifications of the process parameters to reach a microstructure that meets the specifications of the product. So the study followed three flows: (1) forged tempered, hardening and normalized without controlled cooling; (2) forged tempered, hardening and normalized with controlled colling; (3) forged tempered and hardening with controlled colling, in wich the behavior of the hardness profiles and microstructures was analyzed. Finally, the results of hardness and microstructure obtained with the implementation of the controll coolling were satisfactory. In addition, the heat treatment step of normalize was eliminated, generating energy savings and increasing the productivity of the company due to the reduction of the lead time process.

KEYWORDS: CONTROLLED COOLING; FORGING; MICROSTRUCTURE

1. INTRODUÇÃO

Considerando o crescimento do mercado automotivo, com frequência surgem novos projetos para as empresas do ramo, fazendo com que haja uma busca por novos parceiros em certos componentes para a sustentação da produção e do seu fluxo contínuo. Esse é o cenário encontrado na empresa parceira desse estudo, que terá seu nome preservado. Trata-se de uma fabricante de sistemas e soluções de transmissão e semi-eixos para o setor automotivo. A companhia projeta, desenvolve, fabrica e integra uma ampla gama de tecnologias de transmissão de automóveis do mundo.

O tema desse trabalho consiste em mostrar a influência do resfriamento controlado nas propriedades finais do aço SAE 1050 para obter as características desejadas pelo fabricante de acordo com as normas técnicas para o uso da peça. O estudo baseia-se em uma proposta feita pela empresa a um novo fornecedor para o desenvolvimento de forjados de um componente do semi-eixo homocinético automotivo conhecido como Anel Interno em pista V (AIV). Essa medida foi necessária ser tomada pela fabricante para abastecer a demanda prevista em novos projetos. A matéria-prima do AIV é o aço SAE 1050 modificado. Entretanto, as primeiras amostras do novo fornecedor de forjados do AIV apresentaram problemas em sua microestrutura ao final do processo de produção. Com isso, os requisitos mínimos exigidos pela empresa na parte microestrutural e em propriedades mecânicas não estavam sendo atendidos.

Diante disso, foi solicitado um estudo para solucionar este problema devido à urgência da fábrica em atender todos os projetos e atividades futuras. Observou-se a transformação incompleta de uma fase da microestrutura na superfície da peça ao final do processo de tratamento térmico. Desta forma, o problema deste trabalho consiste em analisar se a influência do resfriamento controlado após forjamento pode acrescentar ao processo uma superfície homogênea da microestrutura. Para que seja possível responder tal questão, o objetivo geral dessa análise é compreender o comportamento das amostras em diferentes etapas do processo. Os objetivos específicos são: (a) avaliar se os valores de dureza das amostras estão de acordo com as normas da empresa; (b) realizar a análise metalográfica dos AIV's em

questão e verificar se a microestrutura desejada é obtida e (c) comparar os testes realizados para escolher a melhor solução a seguir.

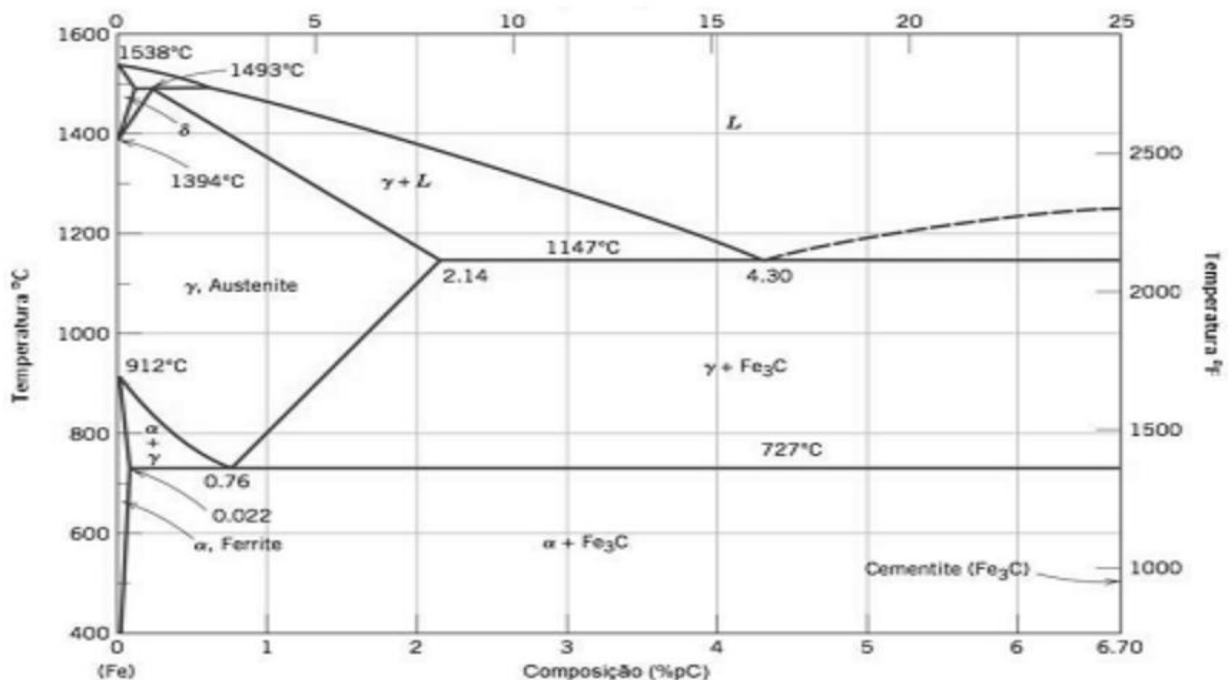
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DIAGRAMA Fe-C

As ligas de Fe-C, aços e ferros fundidos são os materiais mais importantes para a engenharia, porque possuem um grande campo de aplicações. Elas apresentam grande variedade de propriedades mecânicas, o que as tornam versáteis pelo fato do ferro puro apresentar transformação alotrópica, fenômeno conhecido pelo elemento apresentar diferentes estruturas cristalinas ou fases em função da temperatura e/ou pressão (KWIE TNIEWSKI et al., 2014).

Assim, o diagrama Fe-C (figura 1) serve para identificar as fases e características de um determinado aço ao variar a temperatura e a porcentagem de carbono em massa, para uma determinada aplicação de engenharia.

Figura 1 - Diagrama Fe-C



Fonte: CALLISTER, 5 ed. 589p.

Os aços hipoeutetóides são aqueles que contêm um valor menor que 0,77% em massa de carbono. O aço SAE 1050 é um exemplo de aço hipoeutetoide com 0,5% em massa de carbono.

2.2 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Os aços são submetidos à conformação mecânica para alterar sua forma, dimensões e sua estrutura em diversas escalas. A temperatura é uma variável importante para a conformação, assim como a taxa de deformação e o estado de tensões que predomina durante a conformação (COLPAERT, 2008). A conformação mecânica de trabalho à quente é o método utilizado pelos fornecedores da fabricante da peça objeto deste trabalho.

Forjamento à quente

O forjamento é um processo de conformação mecânica mediante aplicação de esforços mecânicos sobre o material onde altera-se plasticamente sua forma. Esse processo pode ser realizado em diferentes temperaturas. A distinção entre a deformação à frio e à quente é que o trabalho é considerado a quente quando a temperatura está acima da temperatura de recristalização do material. Os processos de deformação à quente são caracterizados pela alteração estrutural determinando em grande parte a energia introduzida no material pelos processos de recuperação e recristalização, assim reduzindo a resistência mecânica e a energia necessária para a deformação (COLPAERT, 2008).

No entanto, ocorre a oxidação da superfície do material e distorções associadas a variação de temperatura, gerando perdas do mesmo. Além disso, o produto final fica com baixa qualidade de acabamento superficial e baixa precisão dimensional, necessitando passar por um processo de usinagem. Por utilizar temperatura acima da temperatura de recristalização, durante a deformação, os mecanismos de recuperação e recristalização ocorrem, inibindo a geração de tensões internas e favorecendo a ductilidade pela formação e aumento dos grãos (COLPAERT, 2008).

O tamanho de grão e a microestrutura de um material podem ser modificados no trabalho à quente por meio da recristalização. Esse fenômeno ocorre quando a energia de deformação retida na peça atinge um nível que depende do material e da temperatura, nucleando novos grãos não deformados, eliminando a resistência adquirida pelo encruamento (COLPAERT, 2008).

2.3 PROCESSO TERMOMECÂNICO DOS AÇOS

Antigamente, os processos de conformação à quente não tinham o objetivo de adquirir as propriedades finais no resfriamento ao término da conformação e por isso, ao final, era aplicado um tratamento térmico. Visando reduzir os custos energéticos e produzir aços em tempos menores, desenvolveram-se maneiras de obter estruturas com as propriedades almejadas diretamente após a conformação à quente. O resfriamento controlado é um exemplo típico de processo termomecânico, visando otimizar os processos de decomposição da austenita (COLPAERT, 2008).

Este processo é uma combinação de deformação e tratamento térmico, um método estabelecido e estratégico para melhorar as propriedades mecânicas do aço através do controle de sua microestrutura (DEGARMO, BLACK e KOHSER, 2003). A principal característica do processo termomecânico é a sua sofisticada combinação de operações de deformação bem definida e tratamento térmico em único estágio para controlar a microestrutura do material (MILITZER, 2014). As taxas deste método, temperatura e deformação, são controladas para produzir uma austenita totalmente recristalizada podendo-se obter grãos finos de ferrita seguido do resfriamento controlado (ZHAO e JIANG, 2018 apud VENKATRAMAN e VENUGOPALAN, 2004).

A velocidade de resfriamento é de extrema importância na realização do resfriamento controlado, pois influenciará na microestrutura e propriedades finais do aço. Variando este parâmetro, pode-se obter diferentes fases e proporções destas no material. Porém, vale lembrar que a obtenção destas fases não dependem apenas da velocidade de resfriamento, mas também da composição química e dimensões da peça (DIEHL, 2015 apud CHIAVERINI, 2012). Na fabricação de aços, o processo termomecânico economiza tempo e energia, minimizando ou até mesmo eliminando o tratamento térmico de normalização após o forjamento à quente, aumentando assim a produtividade (YAO e ZHANG, 1986).

2.4 BANDEAMENTO

O bandeamento é uma estrutura típica resultante do trabalho à quente, pois se manifesta pela formação de bandas alternadas de perlita e ferrita ou de outros constituintes com variação significativa do teor de carbono. O carbono é um

elemento intersticial de rápida difusão que tem facilidade de se homogeneizar nos tratamentos de austenitização. O bandeamento pode ser eliminado com tratamentos que possuem resfriamento rápido do campo austenítico (COLPAERT, 2008).

O mecanismo de formação do bandeamento está ligado a segregação dos elementos substitucionais. Quando o aço é austenitizado, a segregação dos elementos substitucionais não é eliminada, devido a baixa difusividade destes elementos. Assim, diferentes regiões do aço “bandas” têm diferentes comportamento na transformação de decomposição da austenita. Assim, a decomposição da austenita se inicia nas regiões mais pobres em elementos de liga que estabilizam esta fase. Se o aço é resfriado com velocidade relativamente lenta para permitir a difusão do carbono, este elemento é rejeitado pelas regiões que se transformam para ferrita inicialmente e se concentra nas regiões que permanecem austeníticas. Quando estas regiões se transformam, estão suficientemente ricas em carbono para formar constituintes bastante diferentes do que seria a estrutura do aço. Entretanto, se o resfriamento é rápido, não há tempo para que ocorra segregação do carbono durante a decomposição da austenita e a única evidência da segregação passa a ser a resposta ao ataque químico (COLPAERT, 2008, p. 361).

2.5 PROCESSOS DE USINAGEM

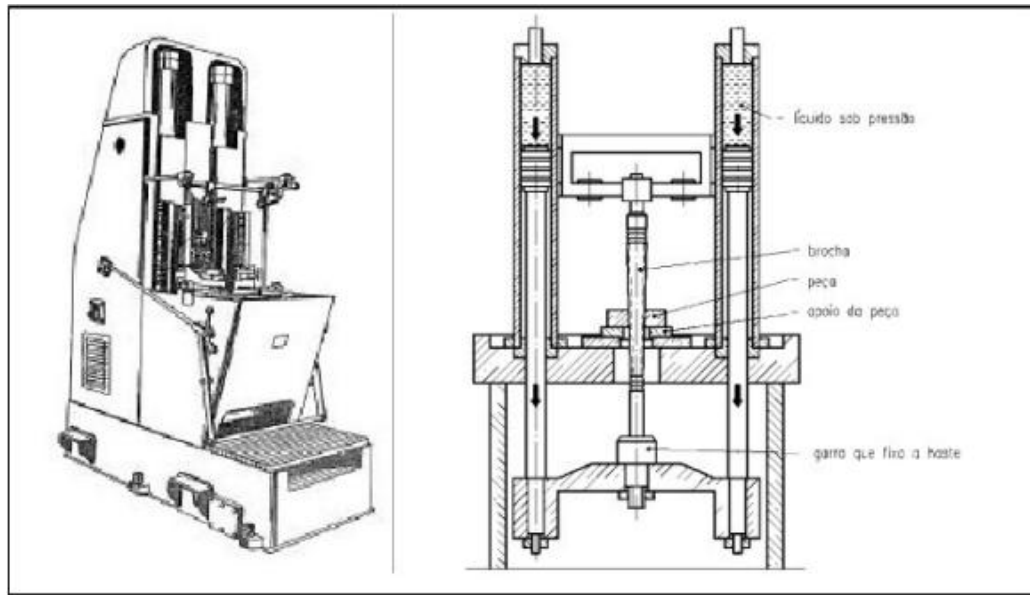
Segundo DIN 8580, aplica-se em todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob forma de cavaco, que é a porção de material retirada pela ferramenta. A usinagem confere formas, dimensões, acabamento superficiais ou a combinação destes.

Brochamento

A operação de brochamento consiste do arranque de material da peça por uma sucessão progressiva e linear de gumes de corte. Essa ferramenta é denominada brocha e a máquina (figura 2) que executa tal operação é denominada brochadeira (MARTINS, 2005). Na empresa em estudo, esse processo é utilizado devido a produção de grandes lotes de AIV, sendo a ferramenta desenvolvida para cada projeto e com o custo calculado no início.

A grande maioria das máquinas é acionada hidráulicamente devido a grande força necessária. Pode-se ter máquinas verticais, como a apresentada na Figura 2, que ocupam menos espaço e que normalmente trabalham com compressão da ferramenta e são as utilizadas na empresa. Alguns equipamentos trabalham com compressão e tração simultaneamente.

Figura 2 - Brochadeira vertical



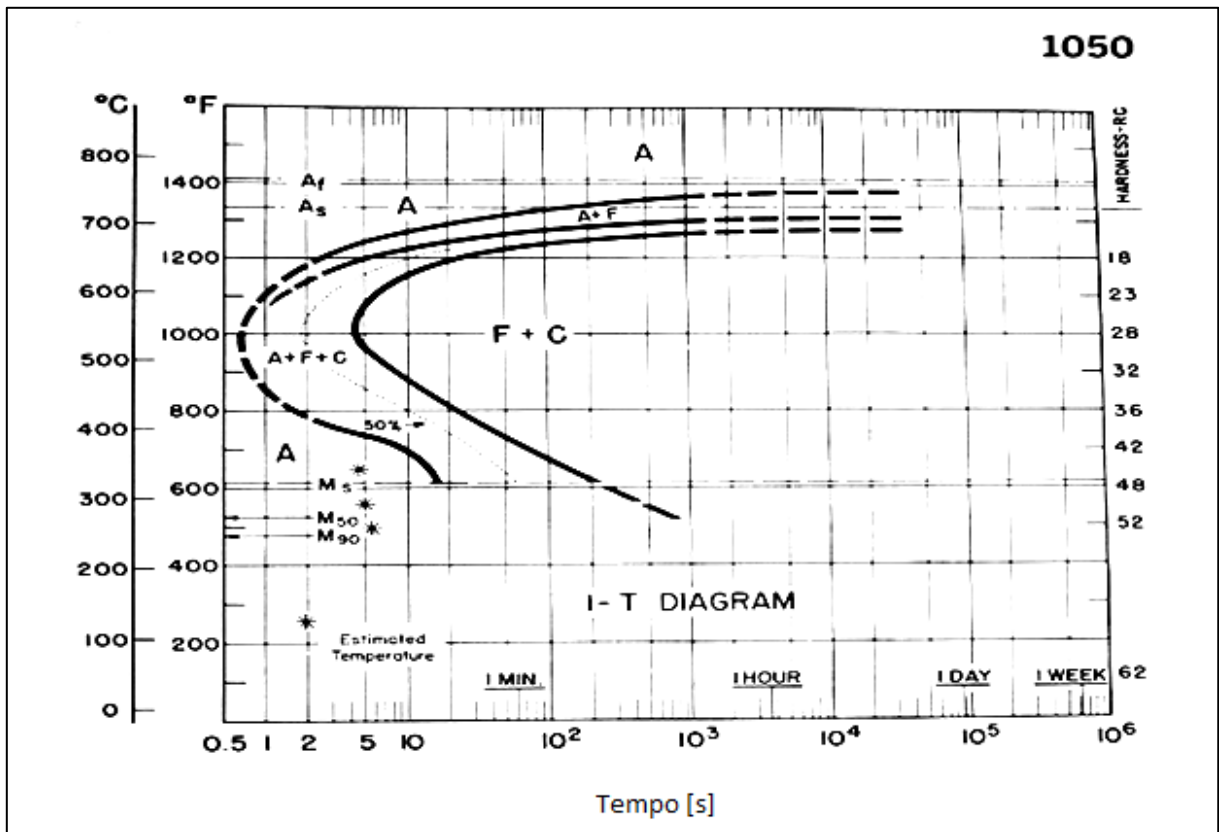
FONTE: Martins, 2005.

2.6 DIAGRAMAS TTT e CCT

O Diagrama TTT (Tempo – Temperatura – Transformação) ou IT (*Isothermal Time Transformation*¹), fornece informações sobre os tipos de constituintes e suas respectivas fases microestruturais numa temperatura escolhida. A Figura 3, mostra o diagrama TTT de um aço SAE 1050, onde haverá transformação parcial ou total de uma determinada fase, em função do intervalo de tempo no qual ele foi submetido a uma determinada temperatura e, após esse período, o material é resfriado rapidamente.

¹ Transformação do Tempo Isotérmico (tradução livre).

Figura 3 - Diagrama TTT do aço SAE 1050



Fonte: Atkins, 1980.

Embora as Curvas TTT sejam importantes para o estudo das transformações que ocorrem nos aços, na maior parte dos tratamentos térmicos utilizados para os aços na indústria emprega-se o resfriamento contínuo e não uma temperatura constante como mostra o diagrama TTT. Para isso, utiliza-se o diagrama de resfriamento contínuo (CCT - *Continuous Cooling Transformation*²) que toma como base o mesmo diagrama TTT, mas com a modificação da linha de resfriamento ser contínua (COLPAERT, 2008).

2.7 TRATAMENTO TÉRMICO

Define-se tratamentos térmicos como um ciclo controlado de aquecimento e resfriamento que almeja produzir propriedades mecânicas específicas através de modificações microestruturais do metal. Estas modificações microestruturais são desenvolvidas sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e

² Transformação de Resfriamento Contínuo (tradução livre).

velocidade de resfriamento com o objetivo de alcançar uma microestrutura “alvo”. O parâmetro de controle mais importante é a velocidade de resfriamento, já que aços de mesma composição química aquecidos sob condições idênticas, mas com resfriamento diferenciado, podem produzir microestruturas e propriedades mecânicas bastante distintas (KWIEŃNIEWSKI et al., 2014).

2.7.1 Normalização

Normalmente, quando um aço é submetido a conformação à quente, apresenta estrutura pouco homogênea e com tamanho de grão grosseiro (COLPAERT, 2008). Portanto, é indicado o tratamento térmico de normalização para obter uma estrutura homogênea, refinada e para a melhora da resistência e tenacidade deste aço. O ciclo térmico de normalização consiste no aquecimento completo de austenitização acima da zona crítica, seguido de resfriamento ao ar. Ciclos sucessivos deste tratamento podem ter efeito favorável sobre o tamanho de grão austenítico, reduzindo o tamanho após cada tratamento de normalização (COLPAERT, 2008).

2.7.2 Endurecimento Superficial

Na construção de máquinas é comum utilizar peças que necessitem de uma boa resistência ao choque e uma dureza elevada para resistir ao desgaste, como por exemplo em automóveis, dentes de engrenagem, matrizes para estampagem, pinos, semieixos, etc (COLPAERT, 2008). Por isso, o endurecimento superficial é utilizado para realizar a combinação de certas propriedades mecânicas dos aços que não possuem outra maneira de ser obtida.

Para muitas aplicações, o desgaste e as tensões mais severas agem somente na superfície da peça. Dessa forma, baixo e médio carbono podem compor o aço para facilitar a deformação plástica, sendo o endurecimento somente ao final do processo por um tratamento de endurecimento superficial. Esse tratamento pode reduzir distorções e eliminar grandes fissuras que ocorrem quando a peça é exposta a um tratamento térmico de endurecimento total, especialmente em peças de grandes seções (KWIEŃNIEWSKI et al., 2014).

O endurecimento superficial produz uma dureza elevada na superfície, boa resistência ao desgaste e tensões residuais compressivas que aumentam a vida em fadiga do componente. Com isso, se obtém uma superfície com alta dureza um núcleo de baixa dureza e grande tenacidade (KWIETNIEWSKI et al., 2014).

2.7.3 Têmpera por indução

A têmpera por indução é realizada pelo aquecimento de materiais condutores de eletricidade pelo emprego de um campo magnético variável, cujas linhas de força entram na peça. Neste procedimento, o campo magnético induz um potencial elétrico que reproduz uma corrente elétrica que dependem das características elétricas do material. As chamadas correntes de Eddy (parasitas) dissipam energia e produzem calor pelo fluxo contra a resistência de um condutor imperfeito (KWIETNIEWSKI et al., 2014).

Neste processo, podem-se limitar as áreas das peças que sofreram o tratamento térmico, as distorções são menores e é possível tratar peças de grande porte. Além do aquecimento ser mais rápido, há ainda a vantagem de utilizar bobinas de diferentes formatos que podem ser facilmente construídas e adaptadas à forma das peças tratadas. A profundidade de aquecimento pode ser controlada pela forma da bobina, espaço entre a bobina de indução e a peça, a potência aplicada, frequência e tempo de aquecimento (SILVA, 2014).

O aquecimento por indução pode diminuir os custos com energia e pode produzir altas taxas de aquecimento, sendo maiores que por métodos de convecção, radiação, condução, entre outros. O sistema de aquecimento indutivo é composto por uma bobina indutiva, uma fonte de corrente alternada e a peça. Um campo magnético variável é formado pelo fluxo de corrente quando a bobina é aplicada à fonte de corrente alternada. Se um objeto condutor de eletricidade é colocado dentro da bobina com uma corrente alternada, correntes de Eddy serão geradas a partir do campo magnético variável dentro do objeto (KWIETNIEWSKI et al., 2014).

Na têmpera por indução existem dois processos aplicados no aquecimento da superfície:

- **Processo Estático:** a bobina permanece parada com a peça a ser temperada até atingir o tempo necessário para aquecimento. Ao atingir o tempo

programado, a força é desligada e a peça imediatamente é resfriada por um meio de têmpera determinado pelo processo (SILVA, 2014).

- Processo Contínuo: a peça ou a bobina move-se ao longo do eixo. A aplicação progressiva de calor é seguida por um resfriamento simultâneo (SILVA, 2014).

A direção da corrente induzida na peça é, aproximadamente, oposta àquela na bobina indutora. As correntes induzidas também geram os seus próprios campos magnéticos, que estão em oposição ao campo gerado pela bobina e, assim, previnem o campo de penetrar no centro do objeto. As correntes de Eddy são mais concentradas na superfície e decrescem em intensidade em direção ao centro do objeto (KWIE TNIEWSKI et al., 2014).

2.7.4 Temperabilidade

A temperabilidade de um aço é uma função da composição química e do tamanho dos grãos de austenita que ele contém no instante da têmpera, que descreve a habilidade do aço ser endurecido pela formação de martensita. Enquanto a dureza da superfície de uma peça depende do teor de carbono e da taxa de resfriamento, a profundidade da camada de martensita formada na peça na qual elevará o nível de dureza depende do fator de temperabilidade (COLPAERT, 2008).

Um metal com alta temperabilidade é aquele que pode transformar-se em martensita sem formar perlita, mesmo quando a velocidade de resfriamento for lenta (REED-HILL, 1973). Qualquer variável que consiga deslocar a linha de transformação perlítica para a direita, movendo o cotovelo da curva, torna possível o surgimento de uma estrutura martensítica com velocidade de resfriamento mais lenta. Sendo assim, a temperabilidade é a capacidade de um aço se transformar parcial ou totalmente de austenita para martensita a uma dada profundidade quando resfriado sob certas condições (KWIE TNIEWSKI et al., 2014).

2.7.5 Meios de têmpera

O resfriamento de um tratamento térmico de têmpera é realizado através de um meio de têmpera com um valor de severidade estipulado para um material específico. A severidade é expressa pelo fator H, tomando o resfriamento em água

como referência ($H=1$). Quanto maior o fator H , mais rápido é o resfriamento, mas com isso aumenta o potencial de ocorrer trincas e distorções com o aumento da severidade de têmpera (COLPAERT, 2008).

2.7.6 Revenido

Ao passar pelo tratamento térmico de têmpera, a peça sofre uma modificação nas propriedades mecânicas do aço. A dureza e a resistência à tração atingem elevados valores no processo de têmpera, mas outras propriedades como alongamento, resistência ao choque, estrição, tenacidade, diminuem seus valores, além de surgir tensões internas apreciáveis ao material (COLPAERT, 2008).

Após o processo de têmpera superficial, as peças passam por um tratamento térmico conhecido como revenido ou revenimento, explicado por COLPAERT (2008). O tratamento térmico de revenido tem o objetivo de corrigir esses valores indesejáveis encontrados em determinadas propriedades, restituindo ao aço grande parte das propriedades perdidas, sem prejudicar as propriedades desejadas pelo tratamento térmico de têmpera (COLPAERT, 1974).

No processo de revenido a peça temperada é reaquecida dentro de uma faixa de temperatura entre 150 °C e 600 °C. O revenido no intervalo de 150 °C a 200 °C produz um aumento modesto na tenacidade, sendo adequado para aplicações que requerem alta resistência mecânica e à fadiga. As peças são aquecidas e permanecem durante um intervalo de tempo suficiente para que ocorram as transformações necessárias para a recuperação de parte da ductilidade e tenacidade perdidas pela têmpera (KWIE TNIEWSKI et al., 2014).

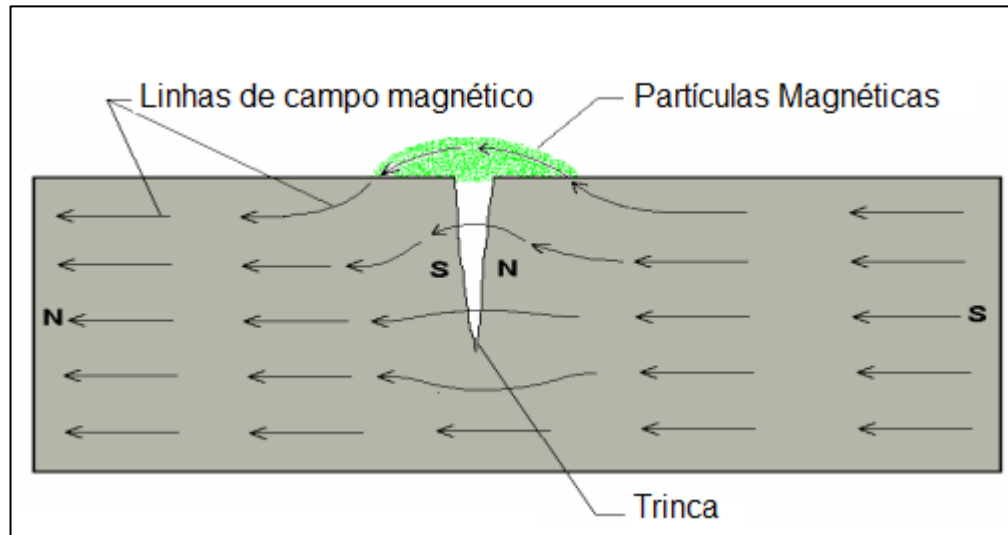
2.8 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

O objetivo do ensaio é detectar e avaliar descontinuidades existentes em materiais ferromagnéticos. Na região magnetizada, as descontinuidades existentes, irão causar um campo de fuga do fluxo magnético (AAEND, 2007).

A aplicação das partículas magnéticas provoca a aglomeração destas nos campos de fuga, uma vez que elas serão atraídas devido ao surgimento de pólos magnéticos, conforme ilustra a Figura 4. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da

descontinuidade através de uma lâmpada ultravioleta dentro de uma cabine escura (AAEND, 2007).

Figura 4 - Princípio da técnica de partículas magnéticas



Fonte: AAEND, 2007, p. 7.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será apresentado de forma detalhada os materiais, procedimentos e parâmetros utilizados no desenvolvimento do estudo a fim de caracterizar os testes realizados com o aço SAE 1050. Primeiramente serão abordados os materiais empregados. Na sequência, será realizada descrição de todos os parâmetros envolvidos em cada etapa do trabalho.

A metodologia empregada no estudo foi selecionar três situações de AIV que foram produzidas das seguintes maneiras: (1) amostras que foram resfriadas em caçambas térmicas e não tiveram o controle de resfriamento, (2) amostras que passaram pelo resfriamento controlado e foram normalizadas, temperadas e revenidas, e (3) amostras que passaram pelo resfriamento controlado e foram temperadas e revenidas.

3.1 MATERIAIS

O anel interno em estudo é produzido com o material SAE 1050 modificado, Produzido por usina siderúrgica do Grupo Gerdau. O AIV possui dimensões de 58,5 mm na condição de forjado e 52,5 mm na condição final. A empresa pesquisada possui tolerâncias rígidas para cada componente produzido em sua responsabilidade, de forma que, todas as especificações determinadas para a peça devem estar de acordo com as normas.

A medição de dureza foi realizada no ponto em que a pista do AIV possui mais contato com a esfera. As tolerâncias do limite de camada, da camada efetiva e das microestruturas estão apresentadas na tabela abaixo.

Quadro 1 - Especificações da fabricante

ESPECIFICAÇÕES	
Dureza de superfície	58 - 62 HRC
Camada efetiva	500 HV
Limite de camada	1,00 - 2,60 mm

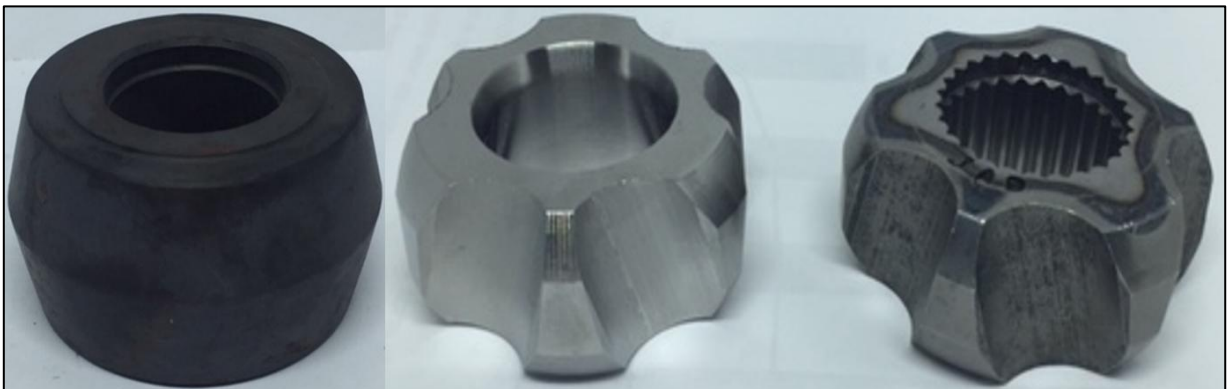
Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 5 - AIV integrando uma parte do sistema do semi-eixo



Fonte: O AUTOR (2018).

Figura 6 – AIV forjado, AIV sem tratamento e AIV temperado e revenido



Fonte: O AUTOR (2018).

A medição da composição química dos AIV's produzidos pelos processos com e sem resfriamento controlado foi realizada no laboratório da empresa através do equipamento espectrômetro de emissão ótica Spectro, modelo Spectrolab do tipo LAVFA18B.

Figura 7 - Equipamento medidor da composição química

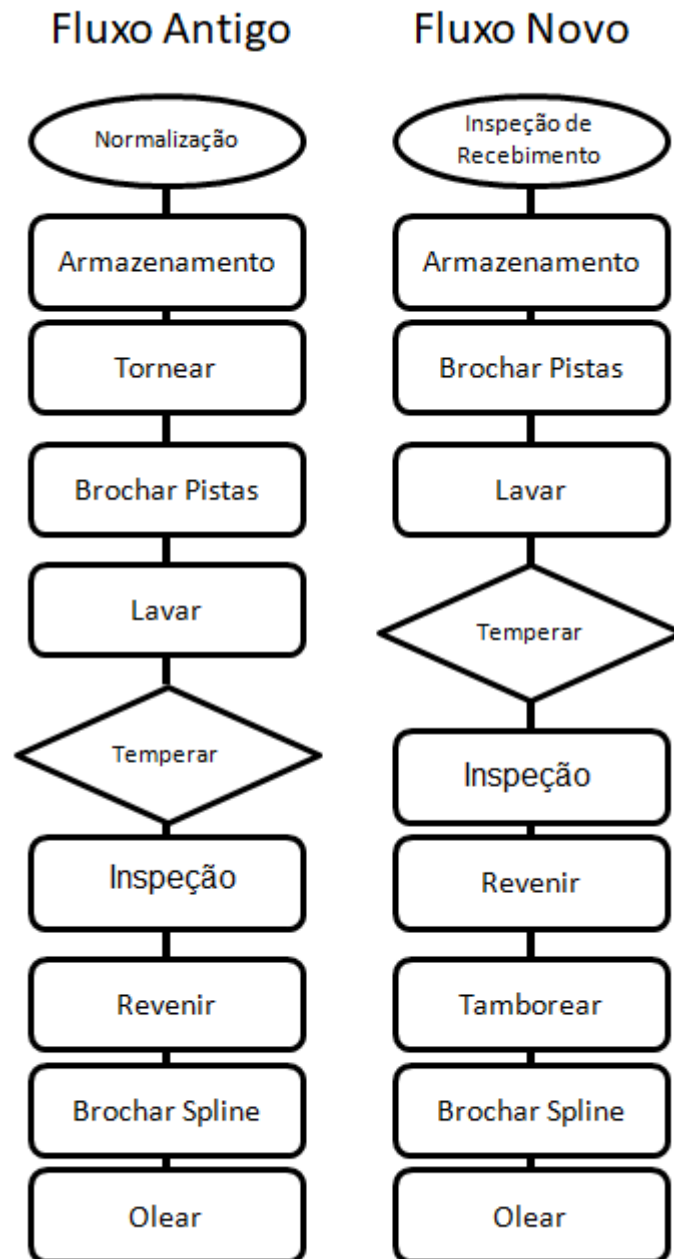


Fonte: O AUTOR (2018)

Para facilitar o entendimento, a Figura 8 apresenta o fluxograma do AIV do início do processo até o produto final, tanto com a realização sem resfriamento controlado (Fluxo Antigo) como com o resfriamento controlado (Fluxo Novo). O Fluxo Antigo mostra o primeiro lote entregue pelo fornecedor, em que não havia controle do resfriamento e no qual o forjado seguiu o fluxo empregado para peças de outros fornecedores de AIV.

Ao detectar problema microestrutural após o tratamento térmico, a empresa designou que fosse realizado um estudo para melhorar as condições do forjado mas sem a geração de novos custos. Portanto, a melhor alternativa encontrada foi implementar o controle de resfriamento após o forjamento à quente na etapa de responsabilidade do fornecedor.

Figura 8 - Fluxograma de processo do AIV antigo e novo



Fonte: O AUTOR (2018).

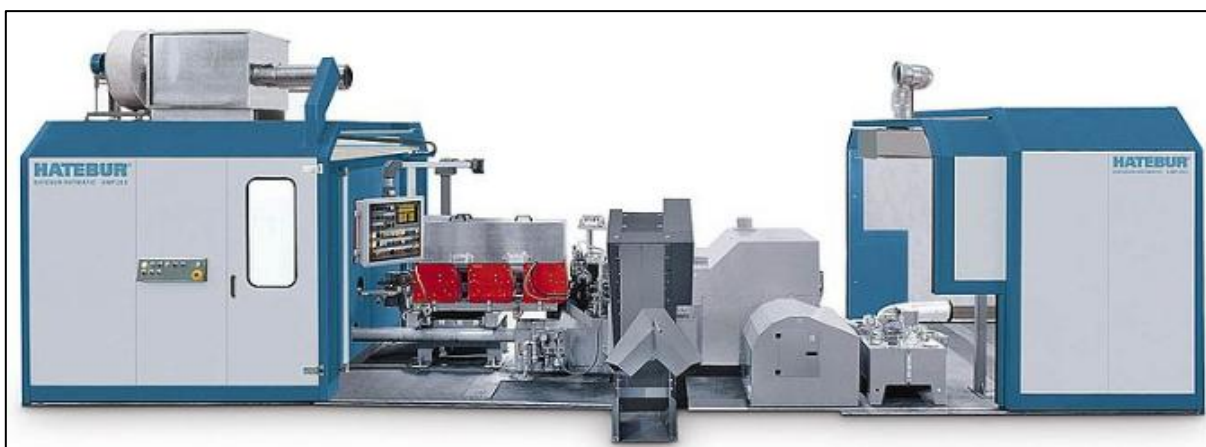
3.2 ETAPA DE FORJAMENTO

O processo de forjamento foi realizado em prensa horizontal Hatebur com matriz confinada. O forjamento é feito em três estágios de conformação mecânica e o aquecimento do blank é realizado por indução, na própria prensa, a uma temperatura de forjamento de $1240 \pm 30^{\circ}\text{C}$. Não há medição de temperatura de forjado durante o forjamento.

Outro parâmetro de processo utilizado no forjamento é a velocidade de 30 Hz (inversor de frequência) que garante o tempo de permanência das peças na esteira e está alinhado com a prensa. A esteira possui 9 metros de comprimento com 3 níveis de esteiras com 3 metros cada. No nível mais alto são colocadas as peças recém forjadas e há dois ventiladores na parte superior. As peças passam pelos níveis da esteira até cair em uma caçamba térmica revestida de refratários. O modelo da esteira e as fotos não foram divulgadas para garantir a segurança do fornecedor.

No processo sem resfriamento controlado, o blank é forjado e depois disso a peça é colocada em uma caçamba térmica junto com outros forjados produzidos para serem resfriados lentamente a temperatura ambiente.

Figura 9 - Modelo de prensa Hatebur horizontal



FONTE: Site Hatebur³

3.3 DEFINIÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a realização do estudo foram coletadas 6 amostras de etapas diferentes do processo. No processo com resfriamento controlado através de esteiras foram coletas amostras das etapas: (1) AIV somente temperado, (2) AIV temperado e revenido, (3) AIV Normalizado, Temperado e Revenido e (4) AIV sem tratamento térmico. Já no processo sem resfriamento controlado, onde o resfriamento é realizado em caçamba térmica, foram selecionadas amostras na etapas: (5) AIV sem tratamento térmico e (6) AIV normalizado e temperado.

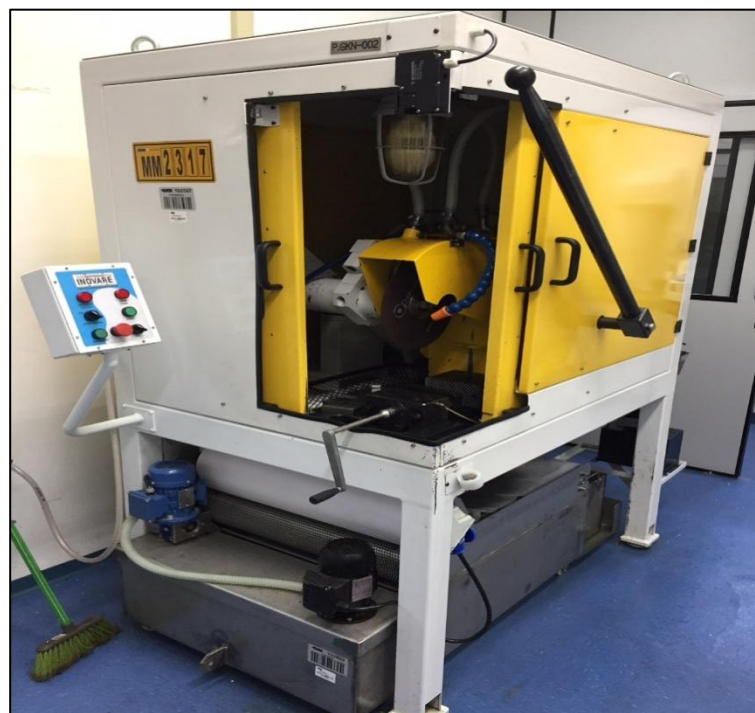
³ Disponível em <https://www.hatebur.com/en/machines-accessories/machines/hatebur/hotmatic/amp-20-s/>

O estudo foi realizado sob as condições submetidas ao AIV para observar o comportamento microestrutural em cada etapa. As peças que passaram pelo forjamento sem resfriamento controlado foram submetidas ao tratamento térmico de normalização empregado anteriormente para outros fornecedores. Já para os AIV's que tiveram controle de resfriamento não foi empregada a normalização.

3.4 ANÁLISE METALOGRAFICA

As amostras foram cortadas nas máquinas produzidas pela Inovare com configurações exclusivas para a empresa e pela Arotec, modelo Arocor 120, com refrigeração automática para evitar a queima da peça. O disco de corte utilizado foi um disco abrasivo de carbeto de silício com tela nas laterais.

Figura 10 - Máquina de corte



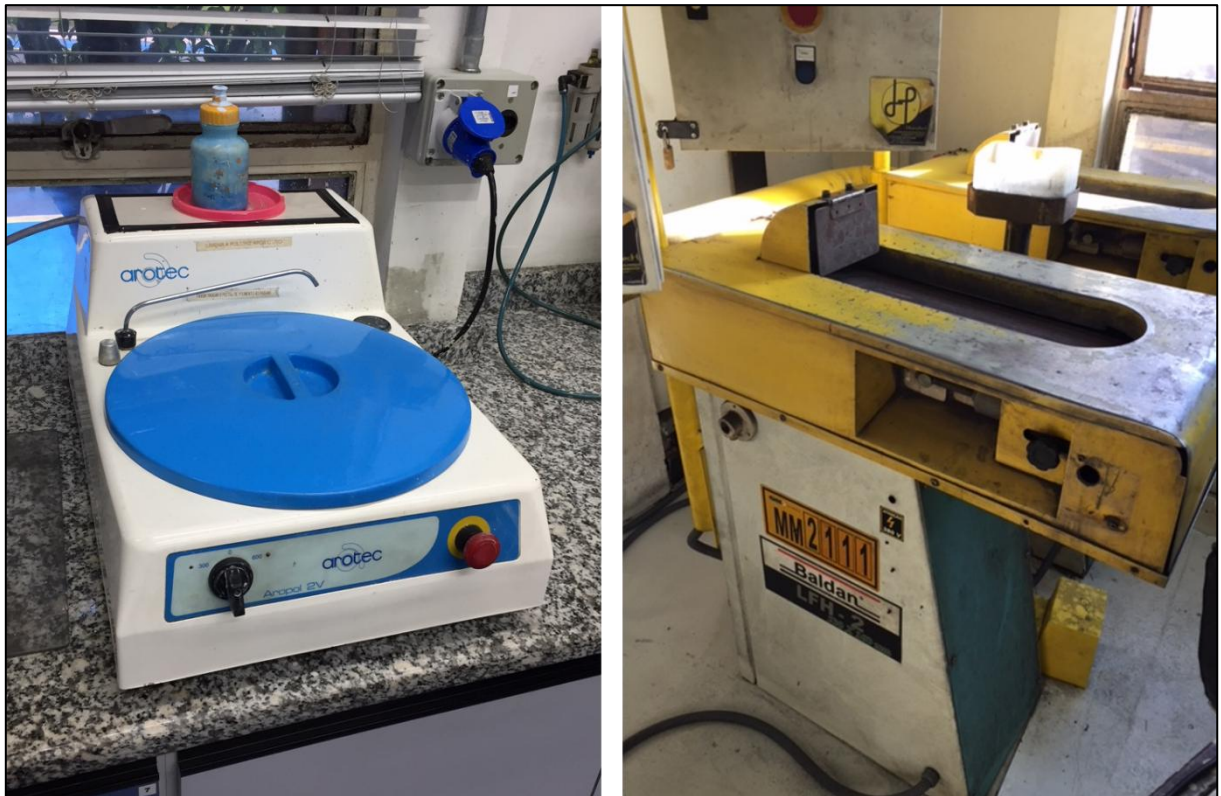
Fonte: O AUTOR (2018).

A lixadeira rotativa utilizada para o preparo metalográfico foi produzida pela Baldan, modelo LFH-2 de granulometria 80 e 240, para o desbaste inicial da amostra. Em seguida, para obter a superfície plana e sem óxidos, as peças foram

preparadas com lixas d'água de granulometria 400 a 1200, mudando a orientação de lixamento a cada troca de lixa.

Posteriormente, as peças passaram para a etapa de polimento, onde foram polidas em disco de polimento específico para pasta de diamante de granulometria de 1 μ m. O polimento foi realizado na politriz fabricada pela Arotec, modelo Aropol 2V.

Figura 11 - Politriz e lixadeira rotativa



Fonte: O AUTOR (2018).

Para revelar a microestrutura da amostra, foi utilizado o reagente químico Nital com teor de 95% de álcool etílico e 5% de ácido nítrico (HNO₃). A análise microscópica das amostras e as fotos tiradas foram feitas pelo microscópio Zeiss, modelo Axio Observer.A1m com câmera acoplada da Axiocom ERc5s. Os perfis de dureza das amostras foram realizados pelo durômetro Buehler, modelo MacroVickers 5114 com penetrador de diamante 136° para dureza Vicker, e pelo durômetro Reichert, modelo BEH1-1 com penetrador de 2,5 mm de formato esférico de carboneto de tungstênio. Os equipamentos podem ser visualizados na Figura 12.

A medição de dureza foi realizada na região da saída de têmpera da peça em que, normalmente, encontra-se a menor dimensão de camada efetiva da peça. Camada efetiva é a camada da superfície da peça que possui a maior dureza, pois é a região que foi temperada. A superfície, a região de transição do limite de camada e o núcleo foram as regiões escolhidas para serem fotografadas com aumento de 100x, 500x e 1000x.

Figura 12 - Microscópio e Durômetros



Fonte: O AUTOR (2018).

3.5 PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO

Para a realização dos testes, as amostras sem resfriamento controlado passaram pelo tratamento de normalização para refinar os grãos. Na primeira etapa, as peças são aquecidas em fornos a 900 °C por 30 minutos e , na segunda etapa, são aquecidas a 830 °C por 30 minutos, totalizando uma hora de aquecimento. O processo de brochamento externo das pistas é realizado antes do tratamento térmico para que a peça tenha boa usinabilidade e não ocorra defeitos por esforço mecânico. A máquina de brochamento utilizada pela empresa é fabricada pela Cajamal Equipamentos, modelo EuroCal 18.

Após a etapa de brochamento das pistas, o AIV segue para o processo de têmpera por indução, realizado pela máquina fabricada pela GH Group. O resfriamento é realizado logo após o término do aquecimento por um polímero sintético com concentração de 10% em água. O produto usado de polímero é o Artemp W510 com taxa máxima de resfriamento de 220,88 °C/s. Os parâmetros da

máquina GH de têmpera por indução são: 1,6 segundos de tempo de aquecimento, 3,5 segundos de tempo de ducha, 29°C de temperatura do meio de têmpera e tensão medida em 400%.

Em seguida, as peças são levadas para uma máquina conhecida como Flux, fabricada pela Multiflux, modelo Foton 3 Altus. Esse equipamento magnetiza e encharca a peça com partículas magnéticas realizando um ensaio não destrutivo para verificar a situação em que o material se encontra, sem afetar fisicamente com a análise. Após inspeção da Flux, o AIV passa pelo tratamento térmico de revenido, em que as peças, dentro de um cesto, entram em forno fabricado pela empresa Jung, modelo E1V44 com sistema de controle e segurança acoplado da Promatec, com temperatura constante de 170 °C por um período de 60 minutos.

Por fim, após todos os tratamentos térmicos, os AIV's passam pela etapa de tamboreamento em um tambor rotativo com pequenas peças de diferentes materiais. Esse procedimento tem a finalidade de polimento, rebarbação e limpeza dos aneis internos. Em seguida, as amostras passam pela última etapa do processo que é o brochamento da parte interna do anel que não foi afetada pelo tratamento térmico, para finalizar o formato e dimensão final do AIV. Para esperar a etapa de montagem, as peças são oleadas para sua proteção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados encontrados, evidenciando a influência do resfriamento controlado pós-forjamento nas propriedades do aço SAE 1050 após tratamento térmico.

4.1 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL

Para identificar a caracterização do aço SAE 1050 modificado na forma recebida pelo fornecedor, foi realizada a análise química do material. Na Tabela 2, na linha “Aço Empregado”, são apresentados os valores encontrados pela análise química. O resultado obtido confirma que os valores estão dentro dos intervalos estabelecidos pela norma.

Tabela 2 - Composição química do SAE 1050 modificado (% em massa)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co
Mínimo	0,50	0,15	0,65		0,010				0,0150	
Aço empregado	0,50	0,23	0,80	0,01	0,017	0,13	0,00	0,05	0,0080	<0,01
Máximo	0,56	0,30	0,80	0,025	0,025				0,0400	

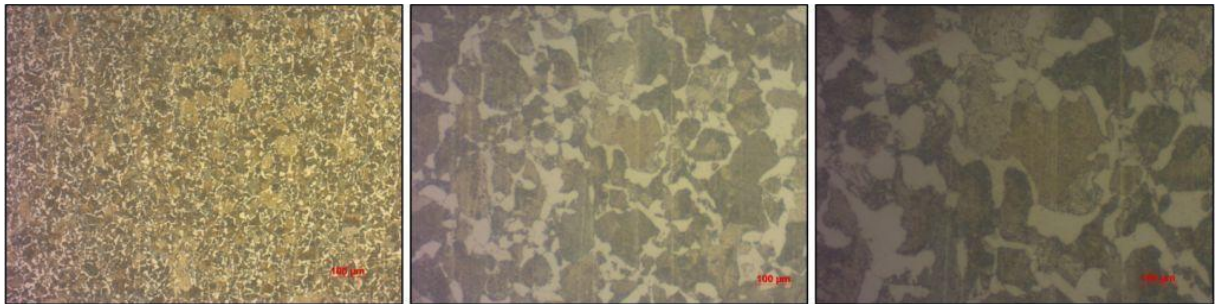
	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Fe	
Mínimo										
Aço empregado	0,12	0,00	0,0035	0,00	<0,01	<0,002	0,003	<0,0001	98,09	
Máximo	0,25									

Fonte: O AUTOR (2018).

4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

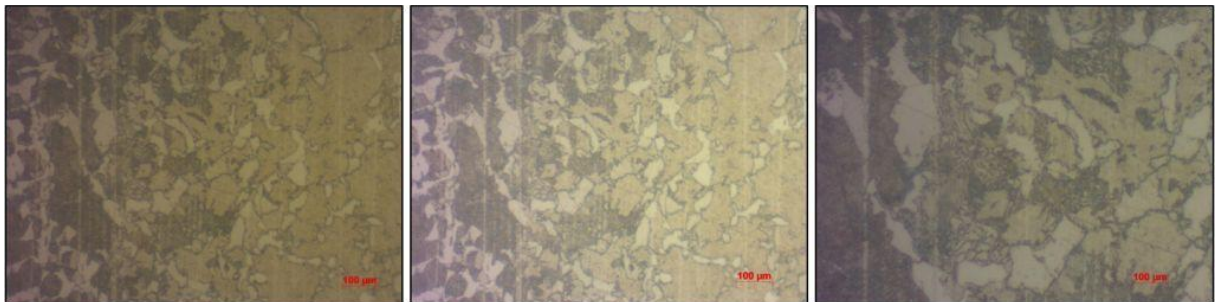
As Figuras 13, 14 e 15 mostram a microestrutura do material SAE 1050 modificado sem controle de resfriamento, resfriado apenas por caçamba térmica revestida de refratários na condição normalizada, temperada e revenida.

Figura 13 - Microestrutura do núcleo sem resfriamento controlado, normalizada, temperada e revenida



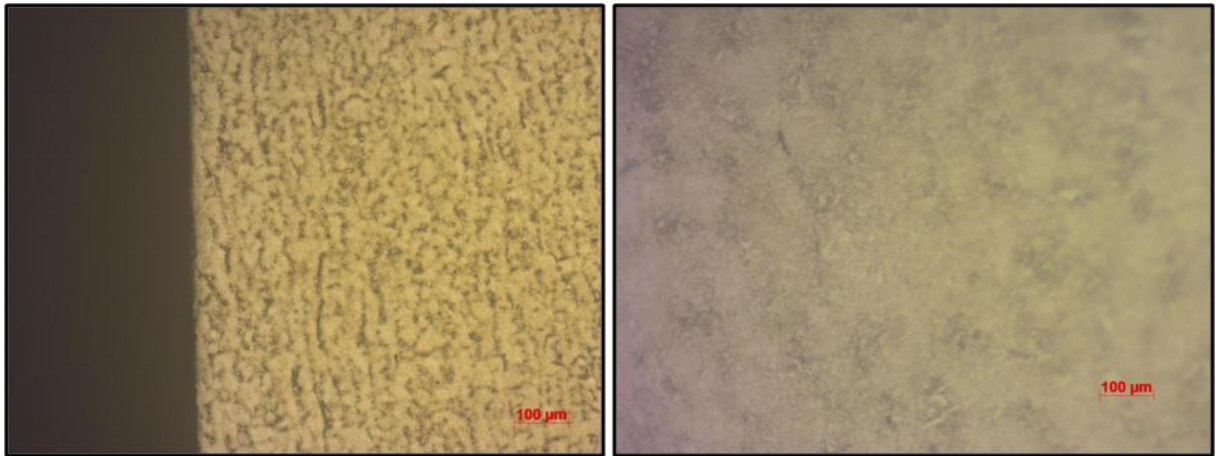
Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 14 - Microestrutura da zona de transição sem resfriamento controlado, normalizada, temperada e revenida



Fonte: O AUTOR (2018)

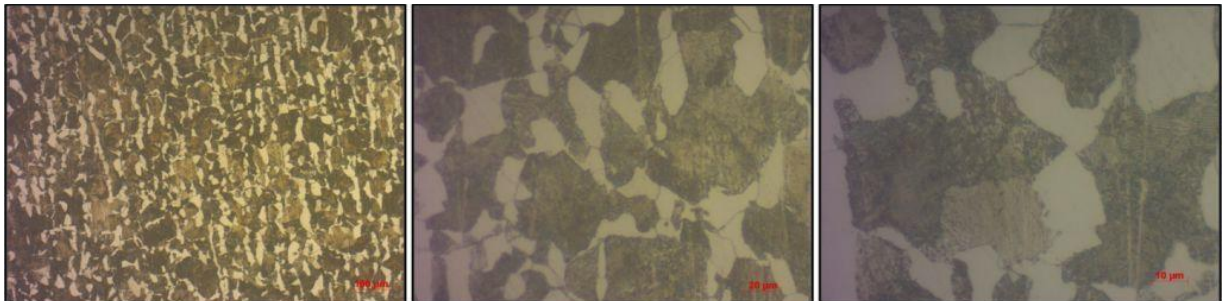
Figura 15 - Microestrutura da superfície sem resfriamento controlado, normalizada, temperada e revenida



Fonte: O AUTOR (2018)

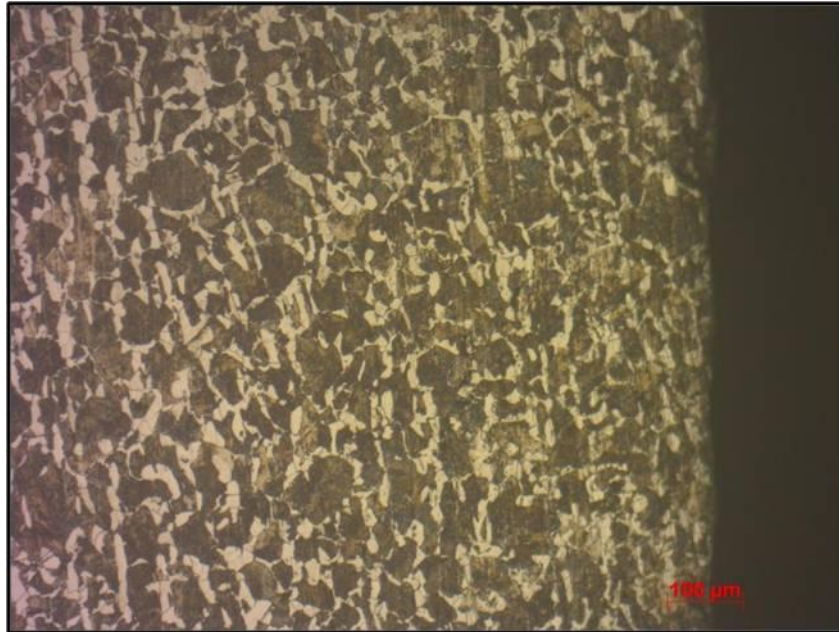
As Figuras 16 e 17 mostram a microestrutura do material SAE 1050 modificado sem controle de resfriamento, resfriado apenas por caçamba térmica revestida de refratários na condição sem tratamento térmico, análise pós-forjamento.

Figura 16 - Microestrutura do núcleo sem resfriamento controlado e sem tratamento térmico



Fonte: O AUTOR (2018)

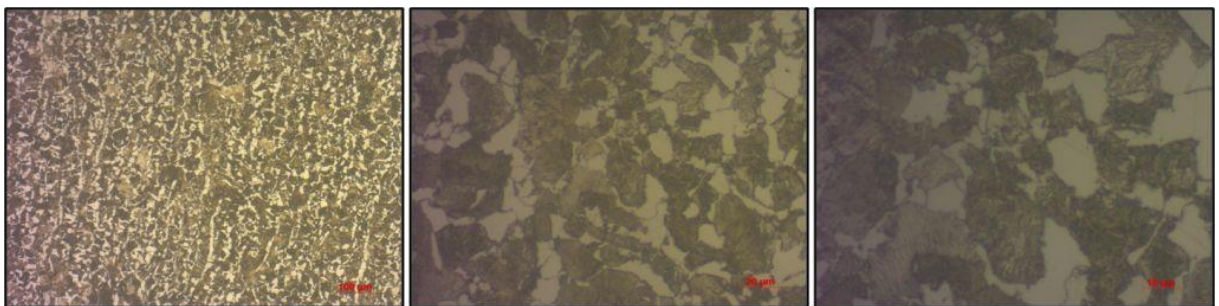
Figura 17 - Microestrutura da superfície sem resfriamento controlado e sem tratamento térmico



Fonte: O AUTOR (2018)

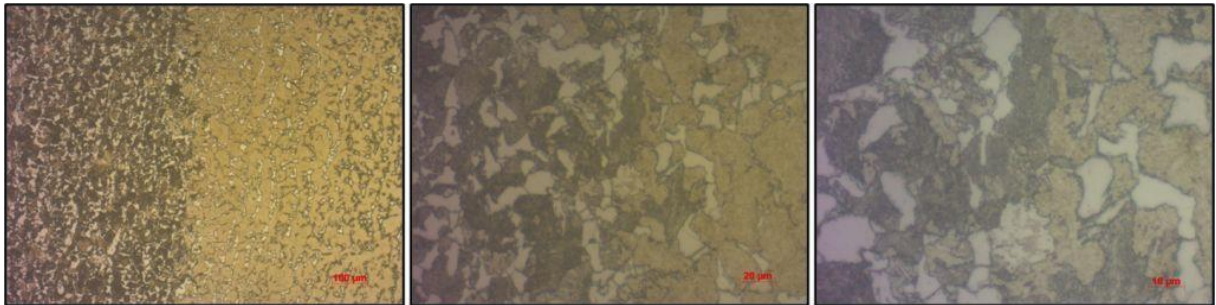
As Figuras 18, 19 e 20 mostram a microestrutura do material SAE 1050 modificado resfriado com resfriamento controlado por esteiras ventiladas e, após o trajeto, colocado em caçambas térmicas revestidas de refratários. O material está na condição normalizado, temperado e revenido.

Figura 18 - Microestrutura do núcleo com resfriamento controlado, normalizado, temperado e revenido



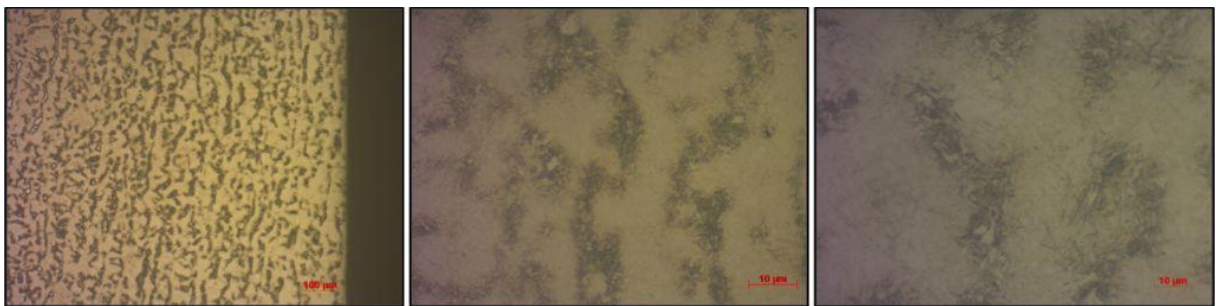
Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 19 - Microestrutura da zona de transição, com resfriamento controlado, normalizado, temperado e revenido



Fonte: O AUTOR (2018)

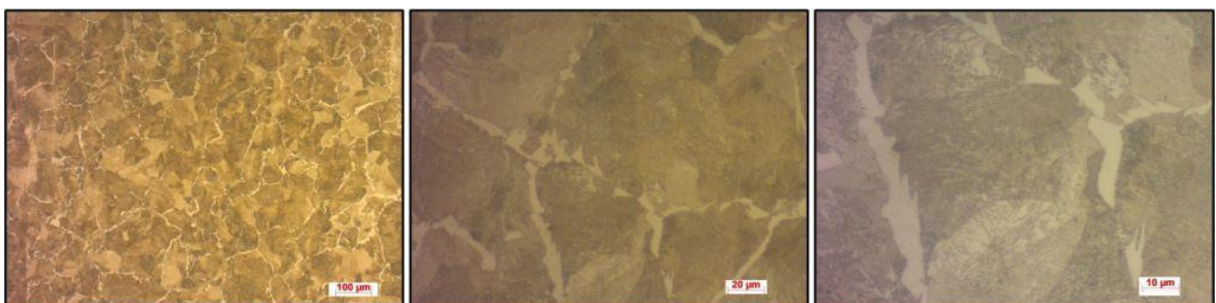
Figura 20 - Microestrutura da superfície, com resfriamento controlado, normalizado, temperado e revenido



Fonte: O AUTOR (2018)

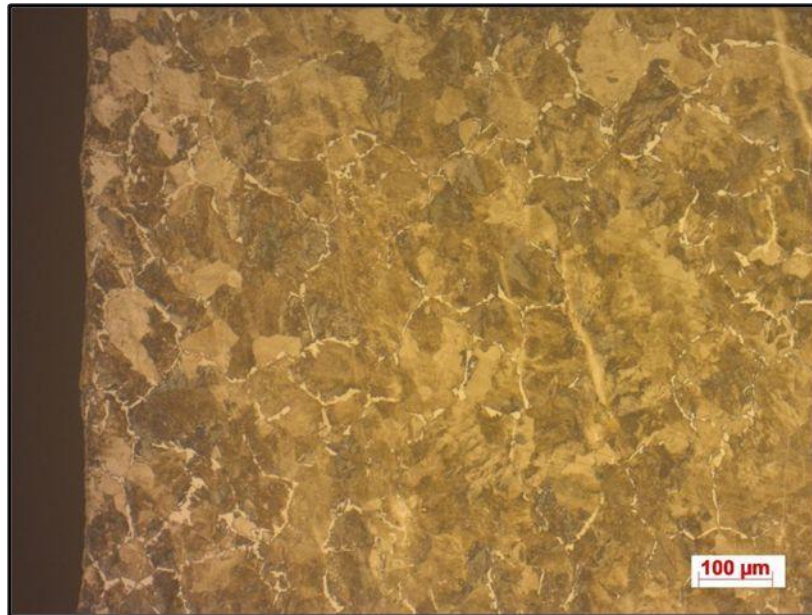
As Figuras 21 e 22 mostram a microestrutura do material SAE 1050 modificado com resfriamento controlado por esteiras ventiladas e, após o trajeto, colocado em caçambas térmicas revestidas de refratários. O material não passou por tratamento térmico, análise de forjado.

Figura 21 - Microestrutura do núcleo com resfriamento controlado, sem tratamento térmico



Fonte: O AUTOR (2018)

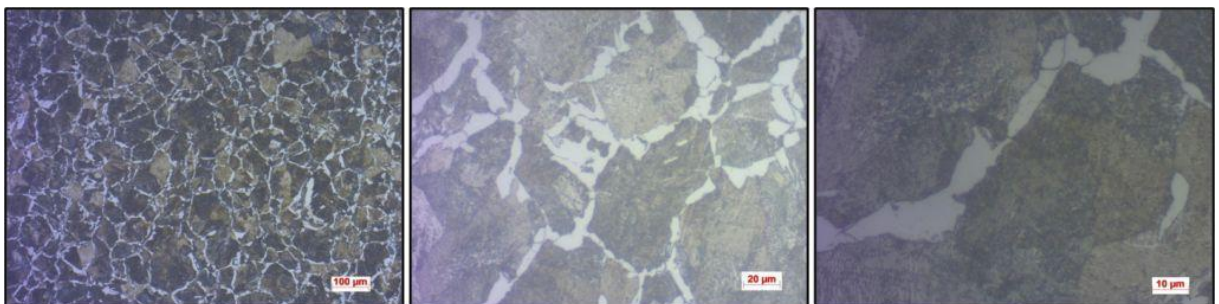
Figura 22 - Microestrutura da superfície em 100x com resfriamento controlado, sem tratamento térmico



Fonte: O AUTOR (2018)

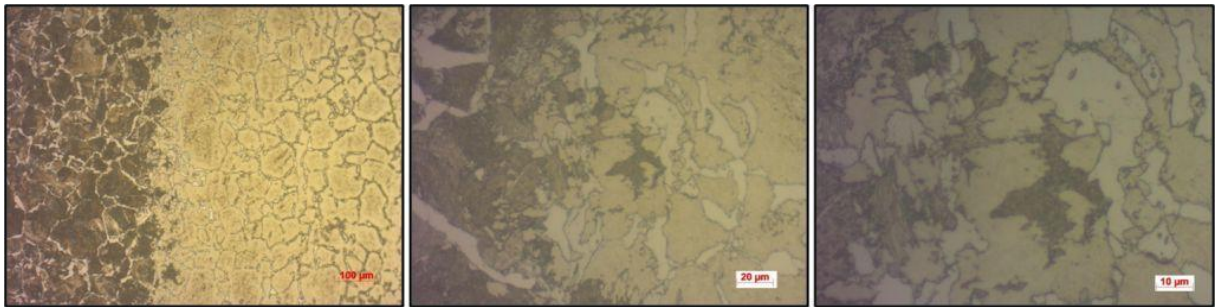
As Figuras 23, 24 e 25 mostram a microestrutura do material SAE 1050 modificado com resfriamento controlado por esteiras ventiladas e, após o trajeto, colocado em caçambas térmicas revestidas de refratários. O material passou pela têmpera por indução e está somente temperado.

Figura 23 - Microestrutura do núcleo com resfriamento controlado, somente temperado



Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 24 - Microestrutura da zona de transição com resfriamento controlado, somente temperado



Fonte: O AUTOR (2018)

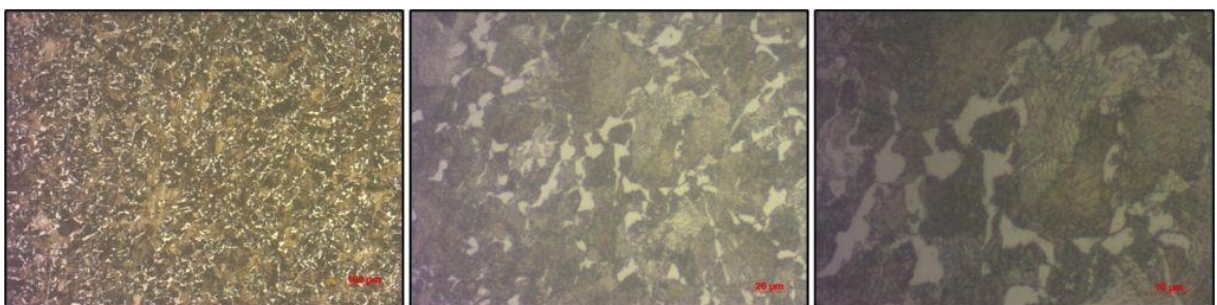
Figura 25 - Microestrutura da superfície com resfriamento controlado, somente temperado



Fonte: O AUTOR (2018)

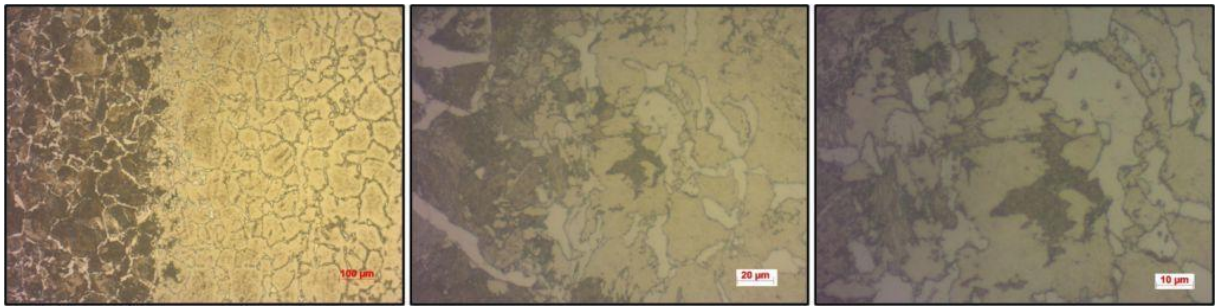
As Figuras 26, 27 e 28 mostram a microestrutura do material SAE 1050 modificado com resfriamento controlado por esteiras ventiladas e, após o trajeto, colocado em caçambas térmicas revestidas de refratários. O material está na condição temperado e revenido.

Figura 26 - Microestrutura do núcleo com resfriamento controlado, temperado e revenido



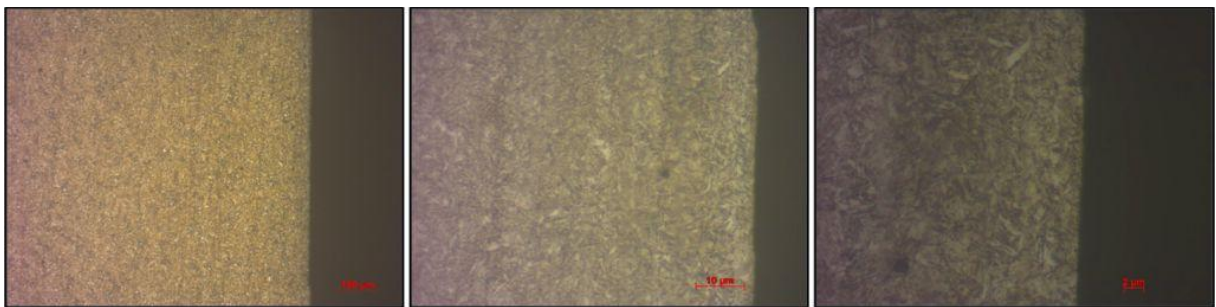
Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 27 - Microestrutura da zona de transição com resfriamento controlado, temperado e revenido



Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 28 - Microestrutura na superfície com resfriamento controlado, temperado e revenido



Fonte: O AUTOR (2018)

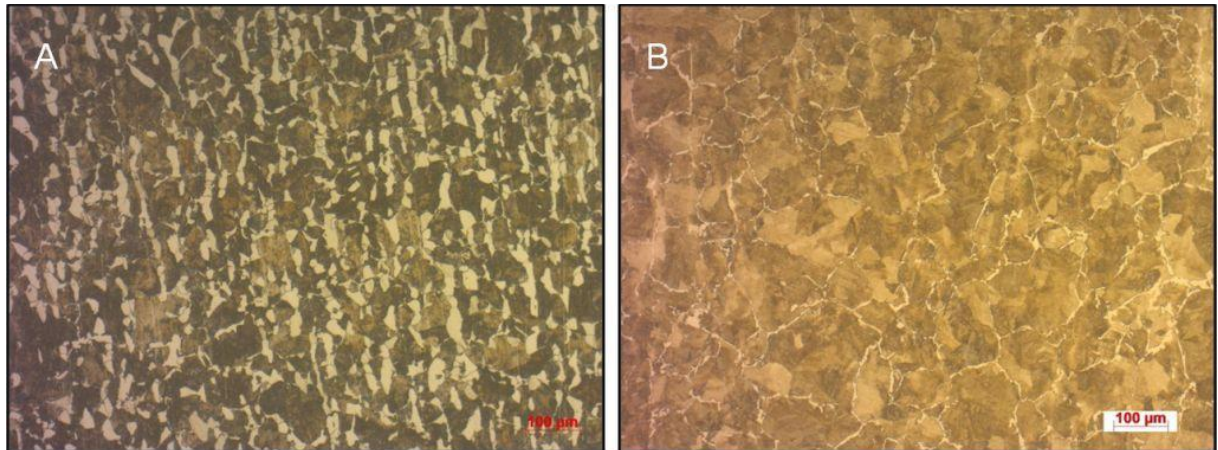
Analisando as microestruturas obtidas em cada etapa dos testes realizados, foram encontrados nos forjados sem resfriamento controlado microestruturas bandeadas após o forjamento à quente, onde bandas de perlita e ferrita com grãos grosseiros de ferrita estavam espalhados pela amostra. Assim, a figura 16 apresenta grãos grosseiros de ferrita, o que dificulta sua difusão, e as amostras apresentaram na figura 15 ferrita livre misturada com a microestrutura martensítica após o tratamento térmico, não obtendo a transformação completa da martensita na superfície da peça, sendo assim o teste realizado sem o resfriamento controlado não foi aprovado para seguir a produção.

Entretanto, com o resfriamento acelerado controlado desse forjado, o bandeamento foi eliminado, apresentando, após o forjamento, uma microestrutura de perlita com ferrita fina nos contornos de grãos (figura 21). Porém, no teste realizado com controle de resfriamento nas condições de normalizado, temperado e revenido, na figura 20 não foi possível obter a transformação martensítica completa na superfície.

Seguindo o caminho proposto com o resfriamento controlado e a retirada da etapa de normalização, é possível observar, na figura 28, a eliminação da ferrita livre

na microestrutura martensítica e obtenção da transformação completa da martensita na superfície da peça. Esse processo facilitou a transformação da microestrutura, sendo possível atingir as especificações da empresa.

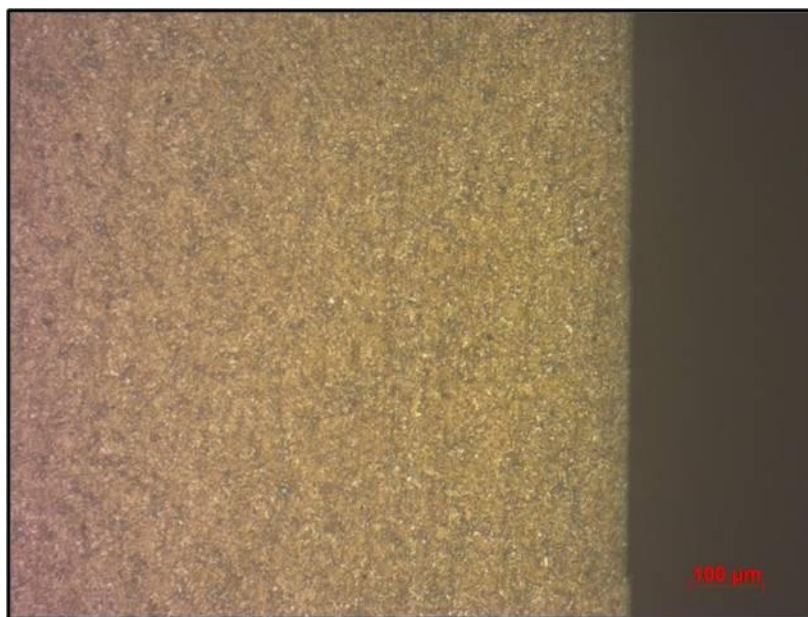
Figura 29 - (A) Forjados sem resfriamento controlado e (B) Forjado com resfriamento controlado em 100x de aumento



Fonte: O AUTOR (2018)

Observa-se que o AIV nas condições de temperado e revenido que passou pelo controle de resfriamento em esteiras ventiladas após forjamento apresentou todos os resultados dentro do padrão da empresa, obtendo a microestrutura alvo do estudo com a ferrita fina nos contornos de grão da perlita. Obtendo essa estrutura, facilita a difusão da ferrita para a transformação martensítica após tratamento térmico, eliminando a ferrita livre da microestrutura. Este estudo já foi aprovado e implementado pela companhia como uma instrução de trabalho, seguindo o Fluxo Novo apresentado anteriormente na Figura 8.

Figura 30 - Microestrutura da superfície do AIV com resfriamento controlado



Fonte: O AUTOR (2018)

4.3 PERFIL DE DUREZA DAS AMOSTRAS

Na Tabela 3 e no Gráfico 31 são apresentados os valores encontrados nos perfis de dureza. Observa-se que a dureza da amostra que não passou pelo resfriamento controlado atende as especificações mínimas exigida pela empresa, mas é reprovada pela má transformação de martensita na superfície do AIV, conforme apresentado na Figura 17.

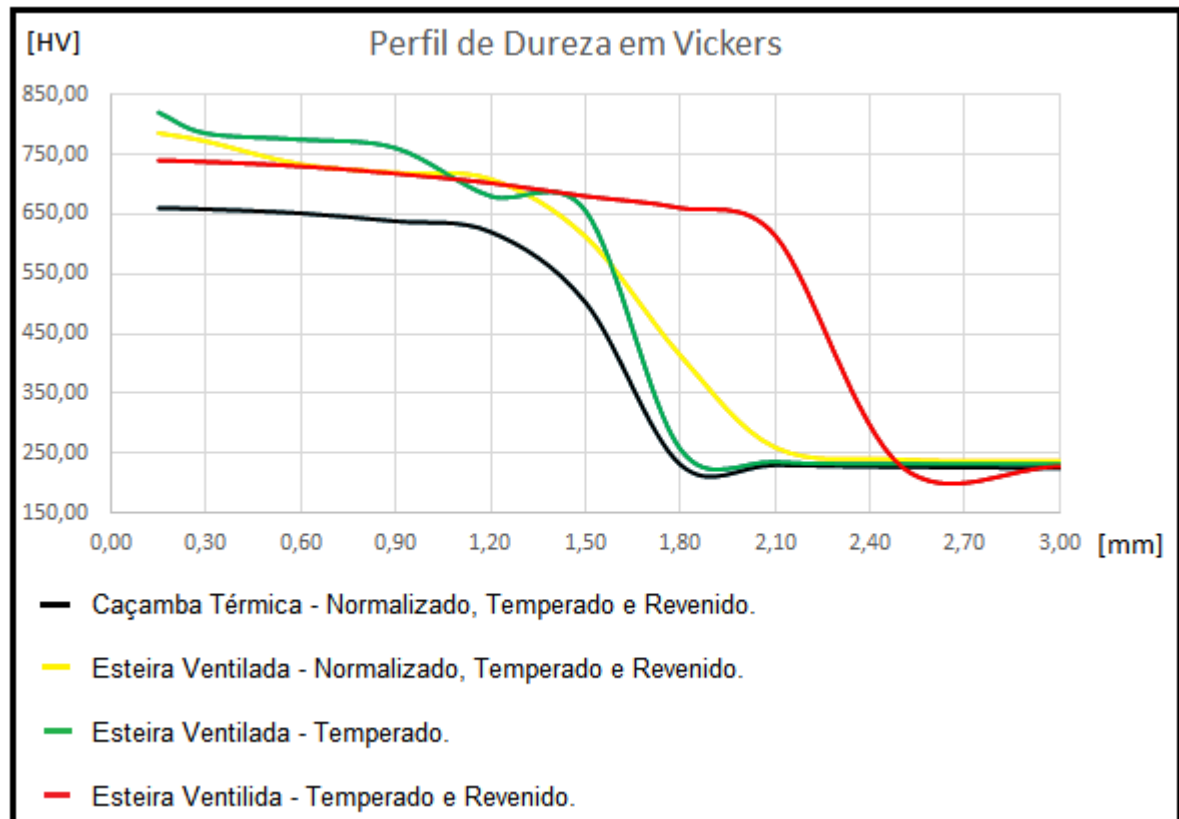
Entretanto, conforme ilustra a Figura 30, a amostra que sofreu resfriamento controlado na condição temperado e revenido, apresenta valores satisfatórios de dureza dentro do intervalo exigido. No Gráfico 31 verifica-se o comportamento mais confiável do perfil de dureza, evidenciando um valor de dureza aprovado e de alto valor na superfície. Além disso, a amostra resfriada por esteira nas condições temperada e revenida apresentou a maior camada efetiva do AIV entre todas as demais do estudo, tendo influência devido a difusão da ferrita, que proporcionou maior tempo de transformação martensítica, gerando maior camada temperada. O resultado das outras amostras serviram como base comparativa de análise nas etapas intermediárias do processo.

Tabela 3 - Resultado de dureza do Aço SAE 1050 sob diferentes condições de análise

	Caçamba Térmica Normalizado, Temperado e Revenido	Esteira Ventilada Normalizado, Temperado e Revenido	Esteira Ventilada Temperado	Esteira Ventilada Temperado e Revenido
[mm]	[HV]	[HV]	[HV]	[HV]
0,15	660,10	785,50	820,00	740,00
0,30	658,20	771,70	785,20	737,50
0,60	651,30	733,50	774,80	730,20
0,90	638,10	719,40	760,40	718,00
1,20	620,10	708,60	680,00	702,30
1,50	502,30	612,60	655,60	680,10
1,80	230,90	413,80	256,60	660,40
2,10	230,00	259,60	235,30	614,00
2,50	227,00	239,40	232,00	227,50
3,00	225,00	237,00	232,00	228,00

Fonte: O AUTOR (2018)

Figura 31 - Perfil de dureza das etapas do estudo



Fonte: O AUTOR (2018)

5. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados encontrados nesse estudo, pode-se afirmar que a influência do resfriamento controlado após forjamento à quente nas propriedades de um aço SAE 1050 modificado foi decisivo para o refinamento da microestrutura. O Novo Fluxo identificado permitiu o atingimento do refino da microestrutura perlítica, com ferrita fina no contorno de grão, e contribuiu para a obtenção de uma superfície com microestrutura martensítica homogênea.

Além disso, foi possível identificar maior confiabilidade no perfil de dureza nos resultados e atingir a microestrutura desejada de superfície. De forma resumida, a amostra de AIV resfriada com esteira ventilada apresentou resultado satisfatório para o problema identificado na empresa e que foi objeto de estudo nessa pesquisa.

Diante do objetivo geral traçado, que consistia em compreender o comportamento das amostras em diferentes etapas do processo e, a partir da avaliação dos valores de dureza e da análise metalográfica, analisar a solução indicada para empresa, conclui-se que o estudo apresentou os resultados a que se propôs. Confirmou-se que a influência do resfriamento controlado após forjamento pode acrescentar ao processo para a obtenção de uma superfície homogênea da microestrutura.

Este estudo foi aprovado e implementado pela empresa. Vale ressaltar ainda que a etapa de tratamento térmico de normalização não é mais necessária e não faz parte do novo fluxo, visto que o resfriamento controlado fornece uma microestrutura refinada pós-forjamento. Com a eliminação do tratamento térmico de normalização, o processo obteve economia de energia, redução de *lead time*⁴ e melhor qualidade ao final do processo.

⁴ Tempo de espera para conclusão de um processo (tradução livre).

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade no estudo da área de interesse do trabalho e colaborar para estudos futuros, pode-se:

- a) Analisar a influência da alteração dos parâmetros na etapa de têmpera por indução, testando variações nos tempos de indução térmica e no tempo de resfriamento da ducha.
- b) Realizar testes com outros produtos da empresa que são normalizados para ver a possibilidade da eliminação dessa etapa com o resfriamento controlado.
- c) Analisar a influência da temperatura de forjamento na microestrutura desse aço.

7. REFERÊNCIAS

- CALLISTER JR. W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução Sérgio Murílio Stam Soares, 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002, 589p.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, ABM, 7ª ed, SP: Brasil, 2012.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. Ed. São Paulo, SP, Ed. Edgard McGraw-Hill, 2008.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**, 3. Ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.
- DEGARMO, E. Paul; BLACK, J T.; KOHSER, Ronald A.. **MATERIALS AND PROCESS IN MANUFACTURING**. 9. ed. 2003. Disponível em: <http://dcetind.weebly.com/uploads/9/1/6/3/9163431/solutions_manual_-_materials___processing_in_manufacturing___demargo_.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2018.
- DIEHL D, Peterson. **Resfriamento controlado: uma alternativa à normalização em componentes forjados a quente**, 2015, Trabalho de Conclusão de Curso.
- KWIETNIEWSKI, C. E. F., KISS, F. J., STROHAECKER, T. R., REGULY, A., **Tratamentos Térmicos de Aços e Ferros Fundidos**. Departamento de Metalurgia UFRGS, 1 Ed., Setembro de 2014.
- MARTINS, Clayton. **Operações de brochamento**. 16 p. Disponível em: <[file:///C:/Users/Lucas/Downloads/brochamento05-2009%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Lucas/Downloads/brochamento05-2009%20(1).pdf)>. Acesso em: 16 jun. 2018.
- MILITZER M. **THERMOMECHANICAL PROCESSED STEELS**. IN: HASHMI MSJ, EDITOR. COMPREHENSIVE MATERIALS PROCESSING. ELSEVIER; 2014.
- REED-HILL, Robert E. **Princípios de metalurgia física**. 2 Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.
- SILVA, M. A. **Influência do processo revenir topo em pontas de eixos temperados por indução**. Canoas, 2014, Trabalho de Conclusão de Curso.
- SIMÕES, Heleno et al. **Uso das Técnicas de END: Ultra-som (TOFD e Phased Array), Radiografia, Partículas Magnéticas e ACFM na Avaliação de Juntas Soldadas com Trincas de Fadiga**. In: CONFERENCIA PANAMERICANA DE END BUENOS AIRES , IV. 2007. 18 p. Disponível em: <<https://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/29.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

VENKATRAMAN M., VENUGOPALAN T. **Issues of divergence in hot strip rolling**. In: Proceeding of the 2nd international conference on thermomechanical processing of steels (TMP'2004), Bélgica: 2004. p. 99–106.

ZHAO J., JIANG Z. **Thermomechanical processing of advanced high strength steels**. Janeiro 2018.

YAO, C.K. et al. **Transformation to pearlite from austenitized and recrystallized austenite**. Materials Science and Engineering, Volume 83, 1. Ed. Outubro 1986.